تعیین تعداد و محل بهینه نصب ریکلوزر در یک فیدر شعاعی فشار متوسط

غلامرضا کامیاب

دانشجوی دکتری برق دانشگاه آزاد واحد علوم و تحقیقات تهران و عضو هیئت علمی واحد گناباد

با همکاری دفتر تحقیقات شرکت توزیع نیروی برق مشهد

کلید واژه ها: :جایگذاری بهینه ریکلوزر در سیستمهای توزیع، قابلیت اطمینان سیستمهای توزیع

چکیده

در سیستمهای توزیع فشار متوسط از ریکلوزرها به منظور ایزوله کردن خطاها و حذف خطاهای گذرا استفاده می شود. این کار سبب کاهش انرژی توزیع نشده و افزایش قابلیت اطمینان سیستم می شود و درآمد شرکتهای برق را افزایش می دهد. از طرفی با افزایش تعداد ریکلوزرها، هزینه های سرمایه گذاری آنها هم افزایش می یابد. در این مقاله تعداد و محل بهینه ریکلوزرهای برای کاهش هزینه ها و افزایش درآمد، تعیین می شود. این کار با تعریف متغیرهای دودوئی برای محلهای پیش فرض اولیه ریکلوزرها و سپس بدست آوردن تابع هدف برحسب این متغیرها انجام می شود. تابع هدف حاصل، یک تابع غیرخطی از متغیرهای دودوئی است که مقدار کمینه آن را با یک روش ساده و مستقیم بدست آورده و بدین ترتیب تعداد و محل بهینه ریکلوزرها تعیین می شوند. در این مقاله نحوه فرموله کردن تابع هدف و روش بهینه سازی آن بر روی یک فیدر شهر مشهد ارائه می شود.

۱- مقدمه

در سیستمهای توزیع فشار متوسط از ریکلوزر به منظور حذف خطاهای گذرا، ایزوله کردن خطاها، مدیریت ساختار شبکه و در نتیجه افزایش قابلیت اطمینان سیستم استفاده می شود. ریکلوزرها نقش اساسی در قابلیت اطمینان شبکه های توزیع ایفاء می کنند و به همین دلیل انتخاب تعداد کافی و محل مناسب برای آنها یک عامل مهم در طرح این سیستمها است. استفاده از ریکلوزر باعث افزایش قابلیت اطمینان سیستم، کاهش انرژی توزیع نشده و درنتیجه افزایش درآمد شرکتهای توزیع می شود. از طرفی چون قیمت ریکلوزرها قابل توجه است؛ لذا استفاده از آنها، باید برای شرکت های توزیع برق توجیه اقتصادی داشته باشد. بنابراین نیاز است که تعداد و مکانهای نصب بهینه ریکلوزرها را تعیین نمود.

انتخاب تعداد و محل مناسب کلیدها و ریکلوزرها یک کار دشوار در طرح سیستمهای توزیع می باشد. شرکتهای برق با استفاده از تجربیات گذشته شان و اطلاعات مشترکین و ملا حظات دیگر تعداد و محل مناسب ریکلوزرها را انتخاب می کنند. تا کنون روشهایی هم برای مطالعات تئوریک این مساله ارائه شده است. در این روشها از الگوریتم ژنتیک [۳و۴] و شبیه سازی پروسه گرم و سرد کردن فلزات (Simulated Annealing) [۲]، آنالیز حساسیت و توپولوژی شبکه[۵] استفاده شده است. انتخاب تعداد و محل ریکلوزرها به عوامل زیادی نظیر ملاحظات قابلیت اطمینان، نوع مشترکین ، تغییرات بار، هزینه های نصب و نگهداری و غیره بستگی دارد. بنابراین باید منافع و هزینه های این کار بررسی شود بطوریکه همه عوامل مزبور را دربرگیرد. در این مقاله یک تکنیک کمینه سازی هزینه ارائه می شود که در آن هزینه های سرمایه گذاری و هزینه های قابلیت اطمینان درنظر گرفته می شود.

مساله پیدا کردن تعداد و محل ریکلوزرهای لازم در شبکه های توزیع شعاعی بزرگ، جزء مسائل بهینه سازی ترکیبی به حساب می آید. حل اینگونه مسائل با روشهای بهینه سازی غیرخطی مرسوم مشکل می باشد. تابع هدف در این مساله ، یک تابع غیرخطی است. در مرجع [۶] روشی برای تعیین مکان بهینه کلیدهای جداکننده در سیستمهای توزیع ارائه نموده ایم که در این مقاله با انجام اصلاحاتی همان روش را برای تعیین تعداد و محل بهینه ریکلوزرها ارائه می کنیم. در این مقاله؛ تابع هدف چنان فرموله می شود که یک تابع غیرخطی از متغیرهای دودوئی بدست می آید و سپس با توجه به شکل کلی تابع هدف، یک روش بسیار ساده و سریع جهت بهینه کردن آن ارائه می شود. این روش یک روش مستقیم و منطقی است که پاسخ بهینه مطلق را در اختیار می گذارد و نیاز به زمان طولانی ندارد. همچنین امکان رسیدن به یک پاسخ بهینه موضعی وجود ندارد. در این مقاله چگونگی فرموله کردن مساله بهینه سازی برحسب متغیرهای دودوئی و روش حل آنها با مثالهای ساده ارائه شده است و در پایان چگونگی فرموله کردن مساله بهینه سازی برحسب متغیرهای دودوئی و یافتن پاسخ بهینه آن برای یک فیدر از شهر مشهد ارائه گردیده است.

۲- قابلیت اطمینان سیستمهای توزیع

در یک سیستم قدرت معیارهای قابلیت اطمینان بیان می دارد که این سیستم تا چه حد به وظیفه اصلی خود که تامین انرژی مصرف کنندگان است، عمل می کند. سطوح قابلیت اطمینان با ملاحظات اقتصادی وابستگی دارند زیرا برای بدست آوردن قابلیت اطمینان بیشتر و یا حتی نگهداری حد فعلی و قابل قبول آن، با توجه به رشد فزاینده شبکه، احتیاج به سرمایه گذاری بیشتری است.

سنجش قابلیت اطمینان با یک دسته شاخصها صورت می گیرد. محاسبه این شاخصها مبتنی بر ریاضیات احتمالات است. از آنجا که معمولا قسمت عمده خاموشی های پیش بینی نشده تغذیه مشترکین، ناشی از سیستم توزیع است، افزایش قابلیت اطمینان آن تاثیر بسزا و عمده ای بر تمامی شاخصهای قابلیت اطمینان می گذارد. یک سیستم توزیع را می توان به دو بخش تقسیم بندی کرد. بخش فوق توزیع و بخشهای شعاعی سیستم. بخش فوق توزیع ارتباط بین سیستم انتقال و پستهای توزیع را برعهده دارد و بخشهای شعاعی بین پستهای توزیع و بارهای مشترکین ارتباط برقرار می کند. فیدرهای فشار متوسط جزء بخش شعاعی هستند که در این مقاله مدنظر می باشند.

دو نوع شاخص برای قابلیت اطمینان سیستمهای توزیع تعریف می شوند. یک نوع شاخصهای اساسی نقاط بار و نوع دوم شاخصهای عملکرد کل سیستم هستند. شاخصهای اساسی نقاط بار از دیدگاه یک نقطه بار مشترک مهم است ولی عملکرد کل سیستم را نشان نمی دهد. عملکرد کل سیستم توزیع با ترکیب وزندار شاخصهای نقاط بار بدست می آیند. شاخصهای اساسی که معمولا برای پیش بینی قابلیت اطمینان یک سیستم

توزیع استفاده می شوند عبارتند از نرخ خاموشی های بار(λ)، متوسط زمان خاموشی (r) و میزان دسترس ناپذیری سالیانه (u). شاخصهای سیستم را می توان با استفاده از این سه شاخص اساسی و تعداد مشترکین متصل به هر نقطه بار محاسبه نمود. مهمترین شاخصهای سیستم عبارتند از شاخص متوسط دفعات قطع سیستم (SAIFI)، شاخص متوسط مدت زمان قطع سیستم (SAIDI)، شاخص متوسط در دسترس بودن سرویس (ASAI)، شاخص متوسط در دسترس نبودن سرویس (ASUI)، انرژی توزیع نشده (ENS) و متوسط انرژی توزیع نشده (AENS) [۱].

در اینجا ما شاخص انرژی توزیع نشده (ENS) را مورد استفاده قرار می دهیم که به صورت زیر تعریف می شود:

$$ENS = \sum_{k=1}^{n} P_k u_k \qquad (1)$$

که P_k متوسط بار متصل به نقطه بار kام و u_k مدت دسترس ناپذیری سالانه نقطه بار kام می باشد و برابر مجموع دسترس ناپذیری خطوطی است که باعث قطع بار می شوند[۱].

دسترس ناپذیری خط iام بصورت زیر تعریف می شود[۱]:

$$u_i = \lambda_i r_i \qquad (2)$$

که λ_i نرخ خطا و r_i متوسط زمان تعمیر خط iام می باشد.

۳- طرح مساله تعیین محل ریکلوزرها و تابع هدف آن

در نقاط مختلف یک سیستم توزیع شعاعی می توان ریکلوزر نصب نمود. هرچه تعداد ریکلوزرها بیشتر باشد؛ در هنگام خطا، نقاط بار کمتری قطع می شوند و انرژی توزیع نشده کمتر شده و درآمد شرکت برق مربوطه بالاتر می رود. از طرفی با افزایش تعداد ریکلوزرها، سرمایه مورد نیاز برای خرید آنها افزایش می یابد. در اینجا هدف این است که تعداد و محل ریکلوزرهای موردنیاز چنان انتخاب شوند که مجموع هزینه انرژی توزیع نشده و هزینه های سرمایه گذاری حداقل شود و در نتیجه درآمد شرکت حداکثر گردد. بنابراین تابع هدف این مساله را به صورت زیر معرفی می کنیم[1]:

$$Minimize \quad F = ECOST + ICOST \qquad (3)$$

که F مجموع هزینه های مزبور است که باید حداقل شود. ECOST مجموع هزینه انرژی توزیع نشده سالانه سیستم و ICOST مجموع هزینه سرمایه گذاری ریکلوزرهاست و همه این هزینه ها برحسب Rial/yr هستند.

هزینه انرژی توزیع نشده را می توان به روشهای مختلف محاسبه نمود. در اینجا ما این هزینه را با محاسبه انرژی توزیع نشده (ENS) و درنظر گرفتن قیمت آن محاسبه می کنیم. یعنی

$$ECOST = ENS * Ep \qquad (4)$$

که ENS مجموع انرژی توزیع نشده سالانه سیستم Ep متوسط قیمت هر کیلووات ساعت انرژی می باشد.

۴- فرموله کردن تابع هدف برحسب متغیرها

درمساله بیان شده در قسمت قبل، موقعیت ریکلوزرها متغیرهای تابع هدف هستند. در این قسمت می خواهیم تابع هدف را بر حسب متغیرهایش بیان کنیم. به همین منظور از سیستم توزیع شعاعی شکل (۱) کمک می گیریم. این شکل قسمتی از یک فیدر توزیع را نمایش می دهد که چهار خط A، B، C و D دارد که سه نقطه بار 1، 2 و 3 را تغذیه می کنند.

ابتدا در تمام نقاط مناسب و ممکن سیستم، ریکلوزرهای فرضی در نظر می گیریم. مثلا در شکل (۱) سه ریکلوزر R1، R2 و R3 ریکلوزرهای فرضی اولیه هستند. برای هر ریکلوزر Ri یک متغیر دودوئی x_i تعریف می کنیم به طوری که اگر $x_i = 1$ باشد به معنی آن است که ریکلوزر Ri وجود دارد و اگر $x_i = 0$ باشد به معنی عدم وجود ریکلوزر Ri می باشد. با این

تعریف هزینه های سرمایه گذاری ریکلوزرها را می توان با روابطه زیر بیان نمود:

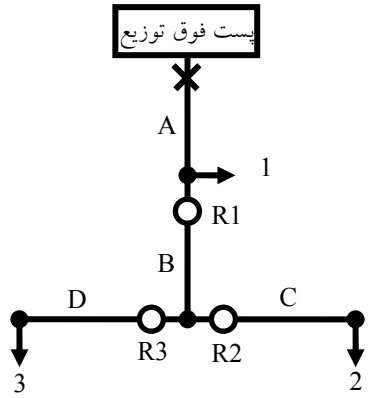
$$ICOST = \sum_{i=1}^{Nr} IC_i x_i \qquad (5)$$

که ICOST مجموع هزینه های سرمایه گذاری

IC_i سرشکن سرمایه مورد نیاز کلید iام برای هر سال بر حسب Rial/yr

Nr تعداد ریکلوزرهای فرضی

و x_i متغیر دودوئی متناظر با ریکلوزر iام است. بدیهی است در صورتیکه ریکلوزر iام وجود داشته باشد $x_i = 1$ بوده و هزینه آن در رابطه (۵) به حساب می آید و اگر کلید iام وجود نداشته باشد، $x_i = 0$ بوده و هزینه آن در روابط مزبور صفر خواهد شد.



شکل (۱): سیستم توزیع ساده برای مثال

اکنون باید انرژی توزیع نشده را بر حسب متغیرهای دودوئی محاسبه کنیم. به همین منظور بر طبق رابطه (۱) باید مدت دسترس ناپذیری سالانه هر نقطه بار (u_k) را محاسبه نمود. ابتدا دسترس ناپذیری هر یک از خطوط A، B، C و D را بر طبق رابطه (۲) بصورت زیر بدست می آوریم:

$$u_A = \lambda_A r_A \quad u_B = \lambda_B r_B \qquad u_C = \lambda_C r_C \quad u_D = \lambda_D r_D \qquad (6)$$

با توجه به ساختار شبکه در شکل (۱) ملاحظه می شود که نقطه بار 3 در یکی از حالات زیر قطع می شود:

الف)وقوع خطا در یکی از خطوط A، B و D

ب) وقوع خطا در خط C در صورت عدم وجود ریکلوزر R2 (یعنی $x_2 = 0$)

لذا دسترس ناپذیری نقطه بار 3 را می توان با رابطه زیر محاسبه نمود:

$$u_3 = u_A + u_B + u_D + u_C x_2' \qquad (7)$$

در رابطه فوق متغیر x_2'، مکمل متغیر دودوئی x_2 است و به صورت $x_2' = 1 - x_2$ تعریف می شود. بدیهی است وقتی $x_2 = 0$ باشد، $x_2' = 1$ بوده و برعکس.

همچنین با توجه به ساختار شبکه در شکل (۱) ملاحظه می شود که نقطه بار 2 در یکی از حالات زیر قطع می شود:

الف)وقوع خطا در یکی از خطوط A، B و C

ب) وقوع خطا در خط D در صورت عدم وجود ریکلوزر R3 (یعنی $x_3 = 0$ و یا $x_3' = 1$)

لذا دسترس ناپذیری نقطه بار 2 را می توان با رابطه زیر محاسبه نمود:

$$u_2 = u_A + u_B + u_C + u_D x_3' \qquad (8)$$

بعلاوه با توجه به ساختار شبکه در شکل (۱) ملاحظه می شود که نقطه بار 1 در یکی از حالات زیر قطع می شود:

الف)وقوع خطا در خط A

ب) وقوع خطا در خط B در صورت عدم وجود ریکلوزر R1 (یعنی $x_1' = 1$)

ج) وقوع خطا در خط C در صورت عدم وجود ریکلوزرهای R1 و R2 (یعنی $x_1' x_2' = 1$)

د) وقوع خطا در خط D در صورت عدم وجود ریکلوزرهای R1 و R3 (یعنی $x_1' x_3' = 1$)

لذا دسترس ناپذیری نقطه بار 1 را می توان با رابطه زیر محاسبه نمود:

$$u_1 = u_A + u_B x_1' + u_C x_1' x_2' + u_D x_1' x_3' \qquad (9)$$

بنابراین برطبق رابطه (۱)و(۴)، هزینه انرژی توزیع نشده برای سیستم شکل (۱) بصورت زیر بدست می آید:

$$ECOST = ENS * Ep = (P_1u_1 + P_2u_2 + P_3u_3) * Ep \quad (10)$$

با جایگذاری روابط (۷)، (۸) و (۹) در رابطه (۱۰) و ساده سازی به نتیجه زیر می رسیم:

$$ECOST = g_0 + g_1x'_1 + g_2x'_2 + g_3x'_3 + g_4x'_1x'_2 + g_5x'_1x'_3 \quad (11)$$

که g_0، g_1، g_2، g_3، g_4 و g_5 ضرائب ثابت بوده و با روابط زیر بدست می آیند:

$$g_0 = Ep(P_1u_A + P_2(u_A + u_B + u_C) + P_3(u_A + u_B + u_D))$$
$$g_1 = EpP_1u_B \quad g_2 = EpP_3u_C$$
$$g_3 = EpP_2u_D \quad g_4 = EpP_1u_C \quad (12)$$
$$g_5 = EpP_1u_D$$

حال با جایگذاری روابط (۵) و (۱۱) در رابطه (۳) تابع هدف برای سیستم شکل (۱) بصورت زیر حاصل می شود:

$$F = ECOST + ICOST = g_0 + g_1x'_1 + g_2x'_2 + g_3x'_3 + g_4x'_1x'_2 + g_5x'_1x'_3 + \sum_{i=1}^{3}(IC_ix_i) \quad (13)$$

با جایگذاری $x_i = 1 - x'_i$ در رابطه فوق و پس از ساده سازی ومنظم کردن متغیرها، رابطه زیر برای تابع هدف حاصل می شود:

$$F = a_0 + a_1x'_1 + a_2x'_2 + a_3x'_3 + b_1x'_1x'_2 + b_2x'_1x'_3 \quad (14)$$

که

$$a_0 = \sum_{k=1}^{4}(IC_k) + g_0 \quad (15)$$
$$a_i = g_i - IC_i \quad i = 1,2,3 \quad (16)$$
$$b_1 = g_4 ; b_2 = g_5 \quad (17)$$

تابع هدف رابطه (۱۴)، یک تابع غیرخطی از متغیرهای دودوئی x'_i می باشد. چون IC_i و g_i از جنس هزینه بوده و نامنفی می باشند، با توجه به روابط (۱۵) و (۱۷) ضرائب a_0 و b_i نامنفی هستند.

$$a_0 \geq 0 \quad (18)$$
$$b_i \geq 0 \quad for \quad i = 1,2,3 \quad (19)$$

ولی با توجه به رابطه (۱۶) ضرائب a_1، a_2، a_3 و a_4 که همان ضرائب متغیرها x'_k در قسمت خطی تابع هدف است، می توانند مثبت و یا منفی و یا صفر باشند. بنابراین بطور خلاصه در تابع هدف ضرائب قسمتهای غیرخطی مثبت ولی ضرائب قسمت خطی ممکن است مثبت و یا منفی باشند. ضمنا a_0 یک عدد ثابت است و نقشی در روند کمینه سازی تابع هدف ندارد و می توان آن را برای کمینه سازی از تابع هدف حذف نمود.

۵- روش کمینه سازی تابع هدف

چنانکه در قسمت قبل دیده شد، تابع هدف یک تابع غیر خطی از متغیرهای دودوئی ریکلوزرها است که ضرائب قسمت غیر خطی آن نامنفی هستند. یک راه برای یافتن مقادیر متغیرها که تابع هدف را کمینه می سازد این است که همه ترکیبهای صفر و یک بودن کلیه متغیرها را درنظر گرفته و به ازای هر ترکیب، تابع هدف را محاسبه می کنیم و با مشخص شدن کمترین مقدار آنها، مقادیر متغیرهای متناظر با آن را بدست می آوریم ولی برای سیستمهای توزیع واقعی، تعداد مکانهای پیش فرض برای ریکلوزر ممکن است زیاد باشد و لذا تعداد متغیرهای x_k نیز زیاد می شوند. بنابراین تعداد ترکیبهای آن بطور صعودی افزایش می یابد و عملا حل مساله را با روش مزبور دشوار می سازد. مثلا یک فیدر با ۳۰ محل پیشنهادی برای ریکلوزر، بیش از یک میلیارد ترکیب مختلف ایجاد می کند. بنابراین با توجه به ویژگیها و شکل تابع هدف، روش بسیار ساده زیر را برای یافتن پاسخ بهینه پیشنهاد می کنیم. این روش طی مراحل زیر انجام می شود:

الف) هرکدام از ضرائب قسمت خطی تابع هدف که مثبت است، متغیرهای دودوئی مربوط به آن را صفر در نظر می گیریم؛ زیرا در اینصورت مقدار تابع هدف هم در قسمت خطی و هم در قسمت غیر خطی کاهش می یابد. چون ضرائب قسمت غیر خطی همواره نا منفی اند.

ب) از بین ضرائب منفی قسمت خطی، کوچکترین مقدار را انتخاب می کنیم و متغیر متناظر با آن را یک درنظر می گیریم؛ زیرا در قسمت خطی باعث حداکثر کاهش مقدار تابع هدف می شود و قسمت غیرخطی (نامنفی) را می توان در مراحل بعدی با انتخاب کردن سایر متغیرها حداقل نمود.

ج) متغیرهای مشخص شده در بندهای (الف) و (ب) را در تابع هدف اعمال نموده و تابع هدف را ساده می کنیم و تا تعیین کلیه متغیرها، مراحل (الف) و (ب) را بر روی تابع هدف ساده شده تکرار می کنیم.

شایان ذکر است که این روش فقط برای توابع هدفی صحیح است که ضرائب قسمت غیر خطی همگی مثبت باشند. برای توضیح بیشتر، روش پیشنهادی فوق را برای حل مثال زیر بکار می بریم.

مثال: فرض می کنیم تابع هدف یک شبکه توزیع شعاعی با چهار محل پیشنهادی اولیه برای ریکلوزر، به صورت زیر بدست آمده باشد[۶]:

$$\begin{aligned} F &= 14704 - 1001x_1' - 1004x_2' \\ &- 483x_3' - 1000x_4' + 38x_2'x_1' \\ &+ 35x_3'x_2' + 556x_4'x_3' + 38x_3'x_2'x_1' \\ &+ 35x_4'x_3'x_2' + 38x_4'x_3'x_2'x_1' \end{aligned} \qquad (20)$$

چنانکه ملاحظه می شود تمام ضرائب قسمت خطی منفی هستند بنابراین طبق بند (ب) روش پیشنهادی، چون ضریب x_2' کمترین مقدار را دارد، $x_2' = 1$ در نظر می گیریم. بر طبق بند (ج) روش پیشنهادی، در تابع هدف مقدار $x_2' = 1$ قرار می دهیم و تابع هدف را ساده می کنیم که حاصل بصورت زیر است:

$$\begin{aligned} F &= 13700 - 963x_1' - 448x_3' - 1000x_4' \\ &+ 591x_4'x_3' + 38x_3'x_1' + 38x_4'x_3'x_1' \end{aligned} \qquad (21)$$

در تابع هدف فوق همه ضرائب قسمت خطی منفی هستند و کوچکترین آنها ضریب x_4'است و لذا $x_4' = 1$ درنظر می گیریم و تابع هدف را ساده تر می کنیم که حاصل عبارتست از:

$$F = 12700 - 963x_1' + 143x_3' + 76x_3'x_1' \qquad (22)$$

در رابطه (۲۲) ضریب x_3' مثبت است بنابراین بر طبق بند (الف) روش پیشنهادی $x_3' = 0$ در نظر می گیریم و آن را در تابع هدف اعمال می کنیم و تابع هدف جدید زیر بدست می آید:

$$F = 12700 - 963x_1' \qquad (23)$$

در رابطه (۲۳) تنها ضریب قسمت خطی منفی است و لذا $x_1' = 1$ قرار می دهیم و به ازای آن مقدار تابع هدف $F = 11737$ بدست می آید. بنابراین جواب بهینه به روش پیشنهادی بصورت زیر بدست می آید:

$$x_1' = x_2' = x_4' = 1 \quad x_3' = 0$$
$$F\min = 11737 \quad Rial/yr \qquad (24)$$

جواب بهینه فوق را می توان با قرار دادن همه ترکیبهای صفر و یک ممکن برای متغیرهای که در اینجا $2^4 = 16$ حالت است، ارزیابی کرد. این کار انجام شده است و جواب فوق بعنوان پاسخ بهینه مورد تائید می باشد. بنابراین در این مثال بهترین حالت آن است که فقط ریکلوزر R3 وجود داشته باشد($x_3' = 0$).

۶- مطالعه فیدر طرقبه شهر مشهد

در این قسمت می خواهیم با استفاده از روش ارائه شده، تعداد و محل بهینه ریکلوزرها را برای فیدر طرقبه از پست آب و برق شهر مشهد بیابیم. شکل (۲) شماتیک ساده شده فیدر مزبور را نشان می دهد. در جداول (۱) و (۲) بارهای تخمینی نقاط بار فیدر و شاخصهای قابلیت اطمینان خطوط فیدر بیان شده است. چنانکه در شکل (۲) ملاحظه می شود، ۱۰ محل اولیه برای ریکلوزرها در نظر گرفته شده است که با R1 تا R10 نشان داده شده است. با توجه به شکل (۲) و به روش ارائه شده در این مقاله دسترس ناپذیری هر یک از نقاط بار به صورت زیر بدست می آید:

$$\begin{aligned} u_9 &= u_A + u_B + u_C + u_D + u_E + u_F \\ &+ u_G + u_H + u_I x_6' x_7' + u_J x_6' x_8' \\ u_8 &= u_A + u_B + u_C + u_D + u_E + u_F \\ &+ u_G + u_H x_{10}' + u_I x_6' x_7' + u_J x_6' x_8' \end{aligned}$$

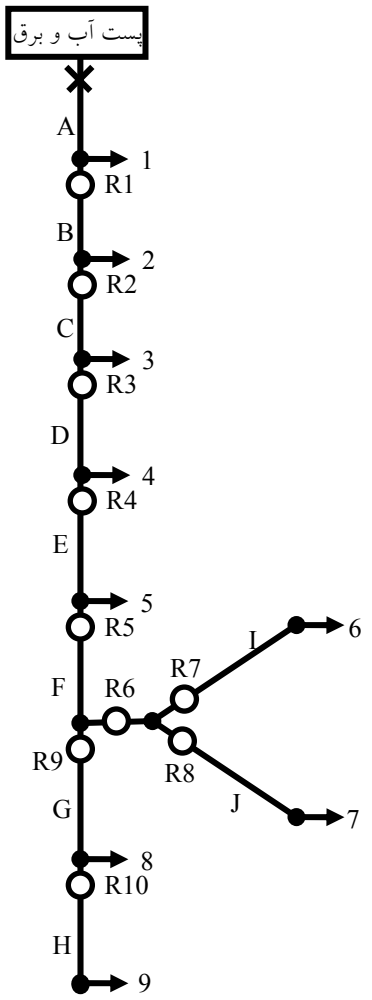
$$
\begin{aligned}
u_7 &= u_A + u_B + u_C + u_D + u_E + u_F \\
&\quad + u_G x'_9 + u_H x'_9 x'_{10} + u_I x'_6 x'_7 + u_J \\
u_6 &= u_A + u_B + u_C + u_D + u_E + u_F \\
&\quad + u_G x'_9 + u_H x'_9 x'_{10} + u_I + u_J x'_6 x'_8 \\
u_5 &= u_A + u_B + u_C + u_D + u_E + u_F x'_5 + u_G x'_5 x'_9 \\
&\quad + u_H x'_5 x'_9 x'_{10} + u_I x'_5 x'_6 x'_7 + u_J x'_5 x'_6 x'_8 \\
u_4 &= u_A + u_B + u_C + u_D + u_E x'_4 + u_F x'_4 x'_5 \\
&\quad + u_G x'_4 x'_5 x'_9 + u_H x'_4 x'_5 x'_9 x'_{10} \\
&\quad + u_I x'_4 x'_5 x'_6 x'_7 + u_J x'_4 x'_5 x'_6 x'_8 \\
u_3 &= u_A + u_B + u_C + u_D x'_3 + u_E x'_3 x'_4 + \\
&u_F x'_3 x'_4 x'_5 + u_G x'_3 x'_4 x'_5 x'_9 + u_H x'_3 x'_4 x'_5 x'_9 x'_{10} \\
&\quad + u_I x'_3 x'_4 x'_5 x'_6 x'_7 + u_J x'_3 x'_4 x'_5 x'_6 x'_8 \\
u_2 &= u_A + u_B + u_C x'_2 + u_D x'_2 x'_3 + u_E x'_2 x'_3 x'_4 \\
&\quad + u_F x'_2 x'_3 x'_4 x'_5 + u_G x'_2 x'_3 x'_4 x'_5 x'_9 + \\
&\quad u_H x'_2 x'_3 x'_4 x'_5 x'_9 x'_{10} + u_I x'_2 x'_3 x'_4 x'_5 x'_6 x'_7 \\
&\quad + u_J x'_2 x'_3 x'_4 x'_5 x'_6 x'_8 \\
u_1 &= u_A + u_B x'_1 + u_C x'_1 x'_2 + u_D x'_1 x'_2 x'_3 \\
&\quad + u_E x'_1 x'_2 x'_3 x'_4 + u_F x'_1 x'_2 x'_3 x'_4 x'_5 \\
&+ u_G x'_1 x'_2 x'_3 x'_4 x'_5 x'_9 + u_H x'_1 x'_2 x'_3 x'_4 x'_5 x'_9 x'_{10} \\
&+ u_I x'_1 x'_2 x'_3 x'_4 x'_5 x'_6 x'_7 + u_J x'_1 x'_2 x'_3 x'_4 x'_5 x'_6 x'_8
\end{aligned}
\qquad (25)
$$

جدول (۱) بارهای فیدر طرقبه

شماره نقطه بار	نام نقطه بار	متوسط بار برآوردی (Kw)
۱	انشعاب پادگان برونسی	۴۰۹,۵
۲	مجتمع مسکونی ۱۰۰۰ واحدی	۸۸۲
۳	پارک شادی	۷۱۱,۹
۴	انشعاب مبل دقت	۱۵۷,۵
۵	انشعاب بند گلستان	۱۵۷,۵
۶	روستای حصار و هتل سحاب	۷۰۲,۴۵
۷	روستای مایون و مایون سفلی	۶۶۱,۵
۸	مصرف کننده های خانگی	۹۴۵
۹	بخش طرقبه	۱۲۶۰

اکنون بر طبق روابط (۱) و (۴) تابع هدف را می توان بدست آورد:

$$
\begin{aligned}
F &= ECOST + ICOST \\
&= ENS * Ep + ICOST \\
&= Ep\sum_{k=1}^{9}(P_k u_k) + \sum_{i=1}^{10}(IC_i x_i)
\end{aligned}
\qquad (26)
$$



شکل (۲): شکل ساده شده فیدر طرقبه پست آب وبرق مشهد

اگر هزینه متوسط هر کیلوات ساعت انرژی توزیع نشده را $Ep = 150 \quad Rials$ گرفته و هزینه سرمایه گذاری هر ریکلوزر را ۴۰ میلیون ریال و مدت بهره برداری را ۱۵ سال فرض کنیم. سرشکن هزینه سرمایه گذاری هر ریکلوزر برابر $IC_i = 40000000/15 = 2666667$ ریال در سال می شود. با جایگذاری عددی در رابطه (۲۶)، تابع هدف غیر خطی بدست می آید که در اینجا به علت طولانی بودن از نوشتن آن صرفنظر می شود. با استفاده از

روش بهینه سازی ارائه شده، پاسخ بهینه تابع هدف مزبور بدست آمد که به صورت زیر است:

$$x_1 = x_2 = x_3 = x_4 = x_5 = x_7 = x_8 = x_{10} = 0$$
$$x_6 = x_9 = 1$$
$$F\min = 20096000 \quad Rials/yr \tag{27}$$

یعنی بهترین حالت آن است که دو ریکلوزر R6 و R9 نصب شوند.

ضمنا جواب بهینه فوق را می توان با قرار دادن همه ترکیبهای صفر و یک ممکن برای متغیرهای که در اینجا $2^{10} = 1024$ حالت است، ارزیابی کرد. این کار انجام شده است و جواب فوق بعنوان پاسخ بهینه مورد تائید می باشد.

جدول (۲) اطلاعات خطوط فیدر طرقبه

نام خط	نرخ وقوع خطا λ (f/yr)	متوسط زمان تعمیر r (hours)	دسترس ناپذیری سالیانه u (hours/yr)
A	۰,۶	۲	۱,۲
B	۱,۱	۲,۵	۲,۷۵
C	۲,۳	۲	۴,۶
D	۰,۹	۲	۱,۸
E	۰,۶	۲	۱,۲
F	۰,۶	۲	۱,۲
G	۱,۵	۲,۵	۳,۷۵
H	۱,۲	۲,۵	۳
I	۳	۲,۵	۷,۵
J	۲	۲,۵	۵

۷- نتایج

در این مقاله نحوه تعیین تعداد و موقعیت بهینه ریکلوزرها برای یک سیستم توزیع شعاعی ارائه شد. در تابع هدف بهینه، هزینه انرژی توزیع نشده مورد انتظار و هزینه سرمایه گذاری مد نظر قرار گرفتند. تابع هدف بر حسب متغیرهای دودوئی بیان شد که یک تابع غیر خطی بدست آمد که ضرائب قسمت غیر خطی آن همواره نامنفی بودند؛ همچنین یک روش ساده و سریع برای کمینه سازی تابع غیر خطی مزبور ارائه گردید. این روش اولا بطور مستقیم مقادیر متغیرها را یکی به یکی تعیین می کند. ثانیا جواب بهینه مطلق را در اختیار می گذارد. همچنین در روش پیشنهادی نیاز به جستجو در تمام ترکیبات ممکن متغیرها نمی باشد و متغیرها بترتیب با یک روند مستقیم و سریع و ساده بدست می آیند. روش ارائه شده فقط برای کمینه سازی توابع هدف با متغیرهای دودوئی صحیح است که همه ضرائب قسمت غیر خطی آن مثبت باشند. روش ارائه شده برای تعیین بهینه ریکلوزرهای مورد نیاز برای یک فیدر توزیع فشار متوسط شهر مشهد مورد استفاده قرار گرفت.

۸- مراجع

[۱] Billinton R., Allon R.N., "Reliability Evaluation of Power Systems", Plenum Press., New York, Second Edition.

[2] Billinton R., Jonnavithula S., "Optimal Switching Device Placement in Raidial Distribution Systems", IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 11, No. 3, July 1996, pp. 1646-1649.

[3] Levitin G., Mozal-tou S., Emukis D., "Optimal sectionalizer Allocation in Electric Distribution Systems by Genetic Algorithem", Electric Power Systems Research, 1994, pp. 97-102

[4] Levitin G., Mozal-tou S., Emukis D., "Algorithem for Two Stage Reliability Enhancement in Raidial Distribution System", Electric Power Systems Research, 1996, pp. 303-306

[5] Billinton R., Jonnavithula S., "A Test System for Teaching Overal Power System Reliability Assessment", IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 11, No. 4, November 1996, pp. 1670-1676.

[۶] کامیاب غلامرضا، "جایگذاری بهینه وسائل سوئیچینگ در سیستمهای توزیع شعاعی با استفاده از برنامه ریزی غیر خطی با متغیرهای دودوئی"، هجدهمین کنفرانس بین المللی برق ایران، تهران، ۲۸ مهر ۱۳۸۲، صفحات ۹۳-۱۰۱ جلد سوم.